УДК 624.15

ПРОИЗВОДСТВО НАБИВНЫХ СВАЙ И АНКЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

В.И. Курец, А.Ю. Юшков

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета,
E-mail: kuretz@hvd.tpu.ru

Изложена методика расчета параметров импульса и результатов воздействия ударных нагрузок на грунт и бетонный раствор при электрогидравлическом способе изготовления свай. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными, полученными экспериментально.

Использование свайных фундаментов в строительстве определяется их высокой несущей способностью, технологичностью и экономической эффективностью. Наиболее широко применяются забивные сваи, которые изготовляются на предприятиях стройиндустрии и погружаются в грунт различными способами. Однако, применение забивных сваи в ряде случаев не целесообразно или практически невозможно. К таким случаям относятся: сооружение фундаментов на площадках со сложными геотехническими условиями строительства, вблизи существующих зданий и сооружений, в которых могут возникнуть недопустимые деформации элементов несущих конструкций, или при различных ремонтных работах в стесненных по высоте помещениях и др. Особенно надо отметить работы по укреплению фундаментов при реконструкции и ремонте зданий и сооружений, где использование забивных свай практически невозможно, например, при реконструкции ветхого жилого фонда, общая доля которого в стране значительна. В указанных случаях используют набивные сваи, которые изготавливают непосредственно на строительной площадке. Все виды таких свай (буронабивные, набивные, инъекционные и др.) имеют основной недостаток, который связан с их качеством. Учитывая постоянный рост объема использования набивных свай в строительстве, разработка методов улучшения их качества является актуальной проблемой. Одним из наиболее перспективных методов улучшения качества набивных свай является электрогидравлический способ [1], который позволяет формировать геометрию сваи (уширение ее в основании и по длине, уплотнение грунта под пятой сваи и по боковой поверхности) и, соответственно, значительно увеличивать ее несущею способность. Сваи, изготовленные таким способом, получили название электронабивных свай.

Основной проблемой электрогидравлического способа создания набивных свай является формирование сквозного локального канала разряда в бетонном растворе с относительно высокой удельной электропроводностью (σ~10^{-3} Ом$^{-1}$см$^{-1}$). В настоящее время практически все установки для создания электронабивных свай обеспечивают «тепловую» форму пробоя рабочего промежутка с образованием парогазового чехла в межэлектродном промежутке. Далее происходит электрический пробой парогазовой системы с образованием локального канала разряда. При этом, большая часть энергии импульса затрачивается на образование парогазового чехла. Кроме того, наличие газовой фазы в растворе приводит к значительной диссипации энергии ударной волны и импульсов давления от парогазовой полости, в которую вырождается канал разряда после окончания электрических процессов в нем. Для компенсации потерь, связанных с образованием парогазовой системы, энергию приложенного импульса увеличивают до уровня ~100 кДж. Высокий уровень энергии в импульсе приводит к соответствующему увеличению массогабаритных характеристик источника импульсов, а также к резкому сокращению срока службы электродных систем. В особенности это относится к изолятору потенциального электрода, находящемуся в условиях совместного воздействия высокого напряжения и мощных ударных нагрузок. Указанные недостатки способа производства электронабивных свай могут быть устранены при переходе от «теплового» способа формирования локального канала разряда к «электротепловому». Это позволяет существенно уменьшить непроизводительные потери энергии при изготовлении свай и, соответственно, на порядок снизить запасаемую в источнике импульсов энергию.

Ключевым моментом для организации «электротеплового» пробоя разрядного промежутка является выбор требуемых параметров генератора импульсов и размеров рабочего промежутка, которые обеспечивали бы уменьшение потерь в предпробивной стадии развития разряда при сохранении необходимых ударных нагрузок в бетонном растворе и в окружающем грунте. Основными параметрами, определяющими процессы в электрогидравлической технологии, является: амплитуда импульса напряжения U_0, энергия запасаемая в генераторе W_0, индуктивность L и разрядная емкость C рабочего контура, а также длина рабочего промежутка между потенциальным и заземленным электродами l_0. Амплитуда высоковольтного импульса U_0 определяется условием обеспечения «электротеплового» характера пробоя рабочего промежутка, а ее максимально допустимая величина ограничена надежностью работы изоляции вблизи разрядного промежутка. Известно [2], что минимальный уровень напряжения, обеспечивающий «электротепловой» характер пробоя жидкостей при известных характерных размерах диаметра сваи, составляет ~30 кВ. Та-

ким образом, рекомендуемый уровень амплитуды высоковольтного импульса следует выбирать равным этому значению амплитуды импульса.

Наиболее эффективной конфигурацией электродной системы является «стержень-плоскость». Расчет оптимальной длины рабочего промежутка такой электродной системы при известной амплитуде напряжения можно осуществить с использованием выражения [3]:

$$l_o = 0{,}04 \cdot \frac{U_o}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt[4]{LC}, [м] \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда напряжения [В], A=2,5·10^4 [(В^2·с)/м] – искровая постоянная [2], L [Гн], C [Ф] – индуктивность и емкость разрядного контура.

При U_0=30 кВ, L=15 мкГн, C=10 мкФ оптимальное значение l_0 составляет величину приблизительно равную 30 мм. Указанное значение длины рабочего промежутка является оптимальным, поскольку обеспечивает как необходимую напряженность поля у потенциального электрода, при которой реализуется «электротепловой» характер пробоя бетонного раствора, так и деление энергии импульса между энергией ударной волны и энергией парогазовой полости (ПГП) в пропорции 1:1. Здесь следует отметить, что несмотря на то, что в настоящее время, соотношение вкладов ударных волн и давления при расширении ПГП в процесс увеличения диаметра скважины, однозначно не определены [4, 5], мы придерживаемся модели, в которой роль этих двух процессов одинаково важны. По нашим представлениям, ударная волна создает в окружающем скважину грунте напряженное состояние, приводящее к разрушению его структуры, а давление от ПГП обеспечивает заполнение бетоном ослабленной зоны.

Для выбора оптимальной энергии единичного импульса необходимо установить связь между параметрами импульса и давлением в канале разряда P_m, которое определяет все динамические характеристики в рассматриваемой системе. Величину P_m можно приблизительно определить согласно выражению [3]:

$$P_m = \frac{2}{\tau} \cdot \sqrt{\frac{\rho(\gamma - 1)}{\pi l_o} \cdot (W_o - W_n) \cdot \eta}, \quad (2)$$

где ρ – плотность бетонного раствора; γ – показатель адиабаты (для бетона $\gamma \geq 1{,}26$); $\tau \sim 2\pi\sqrt{LC}$ – длительность периода колебаний разрядного тока в контуре, W_n – потери энергии на стадии формирования локального канала разряда, η – КПД разрядной цепи. Величина емкости C определяется необходимой энергией импульса, а индуктивность L конструкцией генератора, индуктивностью конденсаторов и длиной передающего импульс тракта. В условиях создания электронабивных свай длиной до 10 м возможно добиться значения $L \approx 10...15$ мкГн.

По величине максимального давления в канале разряда P_m, и известном расстоянии от канала разряда R_i до конкретной точки можно определить амплитуду давления на фронте ударной волны $P_ф(t)$ в этой точке [6]:

$$P_ф(t) \approx 0{,}06 P_m \cdot \left(\frac{l_o}{R_i}\right)^2 \exp\cdot\left(-\frac{t}{\theta}\right) \cdot \sigma \cdot [T - t], \quad (3)$$

где $t=R_i/a_0$ – текущее время, a_0 – скорость звука в бетонном растворе (приблизительно 1500 м/с), θ – характерное время уменьшения функции $P_ф(t)$ в e – раз, $\sigma[T-t]$ – разрывная функция, определяющая бросок давления при подходе фронта ударной волны к точке R_i.

На границе раздела сред бетонный раствор–грунт ударная волна разделяется на две составляющие: отраженную и преломленную. Амплитуду давления в преломленной волне можно оценить как [6]:

$$P_{Фг} \sim P_{Ф1} \cdot \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (4)$$

где λ_1 – акустическая жесткость бетонного раствора; λ_2 – акустическая жесткость грунта.

Динамика ПГП и поле давлений в окружающей жидкой среде достаточно хорошо изучена [7]. Распределение давления P_{Ri} в зависимости от расстояния определяется выражением:

$$P_{Ri} = \frac{r}{R_i} \cdot \left[P_m \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{3\gamma} + \frac{1}{2} \cdot P_m \right] - P_0 - P_{ст\,б}, \quad (5)$$

где P_0 – атмосферное давление, $P_{ст.б}$ – гидростатическое давление столба бетонного раствора, r – средний радиус ПГП на стадии расширения, P_m – максимальное начальное давление в ПГП, R_i – текущий радиус, r_0 – радиус канала разряда перед его расширением за счет испарений стенки канала разряда.

Принимая r=0,1 мм, а $r/r_0 \approx 0{,}2...0{,}25$, выражение (5) можно представить в виде:

$$P_{Ri} = \frac{0{,}2}{2R_i} \cdot P_m - P_0 - P_{ст\,б}. \quad (6)$$

Система уравнений (2–4, 6) позволяет рассчитать величины давлений на стенках скважины как функции параметров контура, энергии импульса и текущего расстояния. Для оценки увеличения диаметра скважины можно воспользоваться выражением для модуля сжимаемости грунта E, которое используется при испытании грунтов методом штампа [8]:

$$E = (1 - \mu^2) \cdot \omega \cdot d \cdot \frac{\Delta P}{\Delta h}, \quad (7)$$

где μ – коэффициент Пуассона ($\mu \sim 0{,}3$); ω – безразмерный коэффициент, принимаемый 0,8; d – диаметр штампа, см; ΔP – приращение давления на прямолинейном участке зависимости осадки грунта от нагрузки, Па; Δh – глубина осадки грунта, см.

В рассматриваемом случае поверхность «штампа» представляет собой цилиндр с высотой, равной длине канала разряда l_0, и радиусом, определяемым как расстояние от канала разряда до границы «бетон-грунт» R_i, который дискретно изменяется после подачи импульса по мере расширения ствола скважины за счет приложенных ударных нагрузок. При таком подходе

поверхность «штампа», после приложения к разрядному промежутку i-го импульса, составит $S_i=2\pi\cdot R_i\cdot l_0$, а после ($i$+1) импульса – $S_{i+1}=2\pi\cdot(R_i+\Delta R_i)\cdot 10$, где ΔR_i – увеличение текущего радиуса скважины под действием давления от ПГП, которое можно определить из выражения (6), считая, что $(rP_m/2R_i)>>P_0^*$, где r – радиус канала разряда. В этом случае выражение (7) можно представить в виде:

$$E=\frac{0,5\cdot(1-\mu^2)\cdot\omega\cdot 2\pi\cdot R_i\cdot l\cdot r\cdot P_m}{2\pi\cdot l\cdot R_i\cdot\Delta R_i}=$$

$$=\frac{(1-\mu^2)\cdot\omega\cdot P_m\cdot r}{\Delta R_i}. \qquad (8)$$

Тогда, с учетом всех численных коэффициентов, увеличение радиуса скважины от i-го импульса можно оценить как:

$$\Delta R_i=\frac{0,7\cdot P_m\cdot r}{E^*\cdot N_i}, \qquad (9)$$

где N_i – порядковый номер приложенного импульса.

Общее изменение радиуса скважины при приложении N_i импульсов может быть рассчитано как сумма последовательных изменений от каждого импульса:

$$\sum_1^n\Delta R_i=\sum_1^n\frac{0,7\cdot P_m\cdot r}{E^*\cdot N_i}. \qquad (10)$$

Использование выражения (10) при известном давлении в канале разряда возможно при определении модуля сжимаемости грунта (E^*), т.е. с учетом предварительного разрушения скелета грунта за счет ударной волны. Следует отметить, что вопрос выбора модуля сжимаемости требует отдельного рассмотрения, т.к. глубина и предварительное разупрочнение скелета грунта ударной волной изменяют его значение. Для песков с влажностью 7...10 % можно принять $E^*\approx 1,5\cdot 10^7$ Па [8]. Таким образом, задав требуемое изменение радиуса скважины, свойства грунта и используя практически не изменяемые параметры разрядного контура (U_0, L, l_0), возможно определить величину P_m, а затем по выражению (2), определить необходимую энергию импульса.

Расчеты для песчаного не водонасыщенного грунта показали, что возможно изменение радиуса скважины диаметром 10 см на глубине 6...7 м в два раза при подаче 6 импульсов с энергией 4,5...5 кДж. Расчетные значения увеличения ΔR_i при указанных выше параметрах представлены в таблице.

Таблица. *Расчетные значения изменения ΔR_i от числа импульсов*

N_i	1	2	3	4	5	6
ΔR_i, см	1,86	0,93	0,62	0,46	0,37	0,31

Для проверки корректности предложенной выше методике расчета были проведены эксперименты по созданию электронабивных свай на специальном стенде. Стенд был оборудован датчиками давления для имитации глубины погружения сваи и маркерами, позволяющими оценивать изменение диаметра скважины. Генератором импульсов являлся генератор импульсных токов с выходным напряжением импульса 30 кВ и энергией в импульсе 4,5 кДж. В качестве грунта использовался песок с влажностью 9 %, который утрамбовывался послойно, а сверху прикладывалось давление, имитирующее глубину скважины в 7 м. Бетонную смесь изготавливали из цемента, воды, песка и гелеобразующей добавки для связывания воды. В качестве вяжущего использовали цемент Топкинского завода (Россия) марки М400, Водоцементное соотношение составляло 0,6...0,7, количество добавки для связывания воды составляло 0,02 % от объема бетонного раствора, соотношения цемент песок составляло 1/3.

Экспериментальны проводились в следующей последовательности: в подготовленный грунт с отверстием, иммитирующем скважину, заливалась бетонная смесь и опускался рабочий снаряд, на который подавался импульс, затем по положению маркеров определялось изменение формы бетонного столба, добавлялся бетонный раствор и процесс повторялся. После обработки, полученная свая затвердевала в течении семи суток, затем извлекалась из грунта.

Как следует из представленных результатов, электронабивная свая в зоне обработки увеличилась в диаметре приблизительно в 2 раза по сравнению с контрольной, что должно несомненно привести к увеличению ее несущей способности. Следует отметить удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений изменения радиуса скважины при ее обработке электрическими разрядами, что является подтверждение корректности использования предложенной в настоящей статье методики проведения расчета параметров генератора импульсов для оценок изменения диаметра электронабивных свай в процессе их изготовления.

В качестве заключения к настоящей статье можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика расчета параметров импульса и результатов воздействия ударных нагрузок на грунт и бетонный раствор при электрогидравлическом способе изготовления свай. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с данными, полученными экспериментально. Методика расчета может быть применена для оценок воздействия в других электрогидравлических процессах с использованием разрядов в несжимаемых жидких средах.
2. В результате оптимизации параметров электрогидравлической установки возможно существенное уменьшение энергии импульса по сравнению со значением энергии в импульсе, в используемых в настоящее время установках для создания электронабивных свай, при сохранении тех же несущих характеристиках сваи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балохин Б.В., Джантимиров Х.А. Новые электроразрядные технологии в геотехническом строительстве // Основания, фундаменты и механика грунта. – 1998. – № 4, 5. – С. 47–52.
2. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 206 с.
3. Круглицкий Н.Н., Горовенко Г.Г., Малюшевский П.П. Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях. – Киев: Наукова думка, 1983. – 192 с.
4. Семушкина А.А. Экспериментальное обоснование основных параметров технологического процесса импульсного уплотнения водонасыщенных грунтов при строительстве. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 151 с.
5. Хлюпина Л.П. Физические процессы в песчаных водонасыщенных грунтах при высоковольтных разрядах. Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967. – 163 с.
6. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Госсудиздат, 1961. – 313 с.
7. Наугольных К.А., Рой М.А. Электрический разряд в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
8. Метелюк Н.С., Шишко А.Б., Соловьева А.Б., Грузинцев В.В. Сваи и свайные фундаменты. – Киев: Будевельник, 1977. – 256 с.

УДК 537.52